ChinaXiv合作期刊

引用格式：唐贵谦, 刘钰婷, 高文康, 等. 警惕大气污染和碳排放向西北迁移. 中国科学院院刊, 2022, 37(2): 230-237.
Tang G Q, Liu Y T, Gao W K, et al. Alert to the migration of air pollution and carbon emission to northwest China. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(2): 230-237. (in Chinese)

警惕大气污染和碳排放向西北迁移

唐贵谦[1,2,4]　刘钰婷[1,4]　高文康[1]　王迎红[1]　宋　涛[1,3]　程萌田[1]　王跃思[1,2,4*]

1 中国科学院大气物理研究所　大气边界层物理与大气化学国家重点实验室　北京　100029
2 中国科学院城市环境研究所　区域大气环境研究卓越创新中心　厦门　361021
3 国家地球系统科学数据中心　北京　100101
4 中国科学院大学　地球与行星科学学院　北京 100049

chinaXiv:202303.10092v1

摘要　大气污染物与温室气体有极强的同源性，且与化石燃料燃烧密切相关。我国东部地区高强度的能源消耗导致这一区域一度成为二氧化碳排放和大气重污染问题集中爆发的热点区域。自《大气污染防治行动计划》执行以来，产业结构的调整和末端治理技术的完善，驱动着我国大气污染关键物种的演替和温室气体时空分布格局的变化。为此，文章分析了2013—2020年我国不同区域主要大气污染物和温室气体浓度的演变态势，揭示了大气污染与碳排放从东部向西北地区迁移的现象，厘清了我国大气污染物和温室气体时空分布演变的成因，并提出了相应对策建议，以期为减污降碳协同增效目标的实现提供科学支撑。

关键词　大气污染，温室气体，时空格局，西电东送，减污降碳

DOI　10.16418/j.issn.1000-3045.20211019001

大气污染物不仅危害人体健康[1,2]，还会对生态系统造成恶劣影响[3]。化石燃料燃烧排放污染物的同时，也会排放大量的温室气体，尤其是二氧化碳（CO_2）。温室气体虽然不属于大气污染物，但其引发的温室效应不仅会对当前气候变化造成影响，其影响力甚至可持续数十年，甚至上千年[3,4]。

20世纪以来，随着我国经济的迅猛发展，空气质量出现恶化。2013年1月，席卷大半个中国的重霾污染成为我国决心治理大气污染的导火索[5]。为了应对大气重污染，国务院先后印发并实施了《大气污染防治行动计划》（2013—2017年）和《打赢蓝天保卫战三年行动计划》（2018—2020年）。2017年和2020年底，中国工程院分别对这2次清洁空气行动计划的实施效果进行了评估，结果证实了大气污染治理的有效性[6]①。

*通信作者
资助项目：中国科学院战略性先导科技专项（B类）（XDPB1901）
修改稿收到日期：2021年12月24日；预出版日期：2022年1月29日

① 生态环境部办公厅．关于《大气污染防治行动计划》实施情况终期考核结果的通报（环办大气函〔2018〕367号）. (2018-06-01)[2021-12-24]. https://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/stbgth/201806/t20180601_442262.htm.
生态环境部召开2月例行新闻发布会. (2021-02-25)[2021-12-24]. http://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk15/202102/t20210225_822424.html.

chinaXiv:202303.10092v1

2021年3月，《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》（以下简称《十四五规划》）将碳达峰、碳中和（“双碳”）目标上升到国家发展的战略高度；这一目标的落实需打破环境（大气污染物）和气候（温室气体）的界限，使得减污降碳协同增效成为未来工作的重中之重。

基于以上背景，本文详细分析了清洁空气行动计划实施以来我国大气污染物和温室气体的时空变化趋势。结合《中国统计年鉴》[7,8]、《中国能源统计年鉴》[9,10]和《中国环境统计年鉴》[11,12]分析了我国产业结构调整和末端治理实施情况对大气污染物和温室气体时空格局的影响，阐释出这一演变趋势背后出现的问题，并提出了初步解决方案，期望能为我国减污降碳协同增效目标的实现提供科学依据。

1 大气污染和温室气体时空演变

我国东部平原地区人口众多，重工业发达；中西部地区人口稀少，经济发展相对落后[8]。基于此，本研究以“胡焕庸线”为分界，将我国大陆分为东部地区（北京、天津、河北、黑龙江、吉林、辽宁、山东、河南、安徽、湖北、湖南、上海、江苏、浙江、福建、广东、广西）和中西部地区（山西、内蒙古、陕西、宁夏、甘肃、青海、新疆、四川、重庆、贵州、云南、西藏）。其中，中西部地区南、北产业结构有巨大差异：西南地区以水力发电为主，重工业较少；而西北地区以火力发电为主，重工业较多[8]。因此，将中西部地区以昆仑山—巴颜喀拉山—岷山—大巴山为界，分为西北地区（山西、内蒙古、陕西、宁夏、甘肃、青海、新疆）和西南地区（四川、重庆、贵州、云南、西藏）。基于以上地理划分，本研究以2013年和2020年大气污染物②和温室气体③数据为基础，对3个区域大气污染物和温室气体变化趋势进行统计分析。

1.1 大气污染物

利用我国生态环境部发布的74个重点城市观测结果，分析了2013—2020年6种主要污染物——粗颗粒物（PM_{10}）、细颗粒物（$PM_{2.5}$）、一氧化碳（CO）、二氧化硫（SO_2）、二氧化氮（NO_2）、臭氧（O_3）的年际空间分布变化趋势（图1）。

结果表明，我国不同区域一次污染物（PM_{10}、SO_2和CO）和二次污染物（NO_2、$PM_{2.5}$和O_3）的变化趋势有显著差异。西北地区PM_{10}、SO_2和CO浓度的年均下降幅度最高，分别为9.8 μg·m^{-3}、5.7 μg·m^{-3}和0.10 mg·m^{-3}；东部地区PM_{10}、SO_2和CO浓度的年均下降幅度居中，分别为7.9 μg·m^{-3}、4.3 μg·m^{-3}和0.07 mg·m^{-3}；西南地区PM_{10}、SO_2和CO浓度的年均下降幅度最低，仅为6.8 μg·m^{-3}、2.4 μg·m^{-3}和0.06 mg·m^{-3}。西北地区典型一次污染物PM_{10}、SO_2和CO浓度的年均降幅显著大于东部和西南地区，这表明西北地区对以SO_2和PM_{10}为代表的一次污染物控制成效显著。

与此形成鲜明对比的是，西北地区二次污染物的控制情况。西北地区NO_2和$PM_{2.5}$浓度的年均下降幅度分别为0.5 μg·m^{-3}和3.9 μg·m^{-3}，显著低于东部地区的1.7 μg·m^{-3}和5.3 μg·m^{-3}、西南地区的1.4 μg·m^{-3}和4.1 μg·m^{-3}。

另外，西北地区另一重要二次污染物O_3浓度（8 h滑动最大值第90百分位数）呈现显著的升高趋势，年均升高幅度达6.1 μg·m^{-3}，显著高于东部的2.9 μg·m^{-3}和西南地区的0.9 μg·m^{-3}。这一结果表明，西北地区二次污染程度正在恶化。

1.2 温室气体

利用中国生态系统研究网络在全国布设的5个区

② 数据来自中国生态环境部发布的74个重点城市观测结果。
③ 数据来自中国生态系统研究网络（CERN）观测结果。

ChinaXiv合作期刊

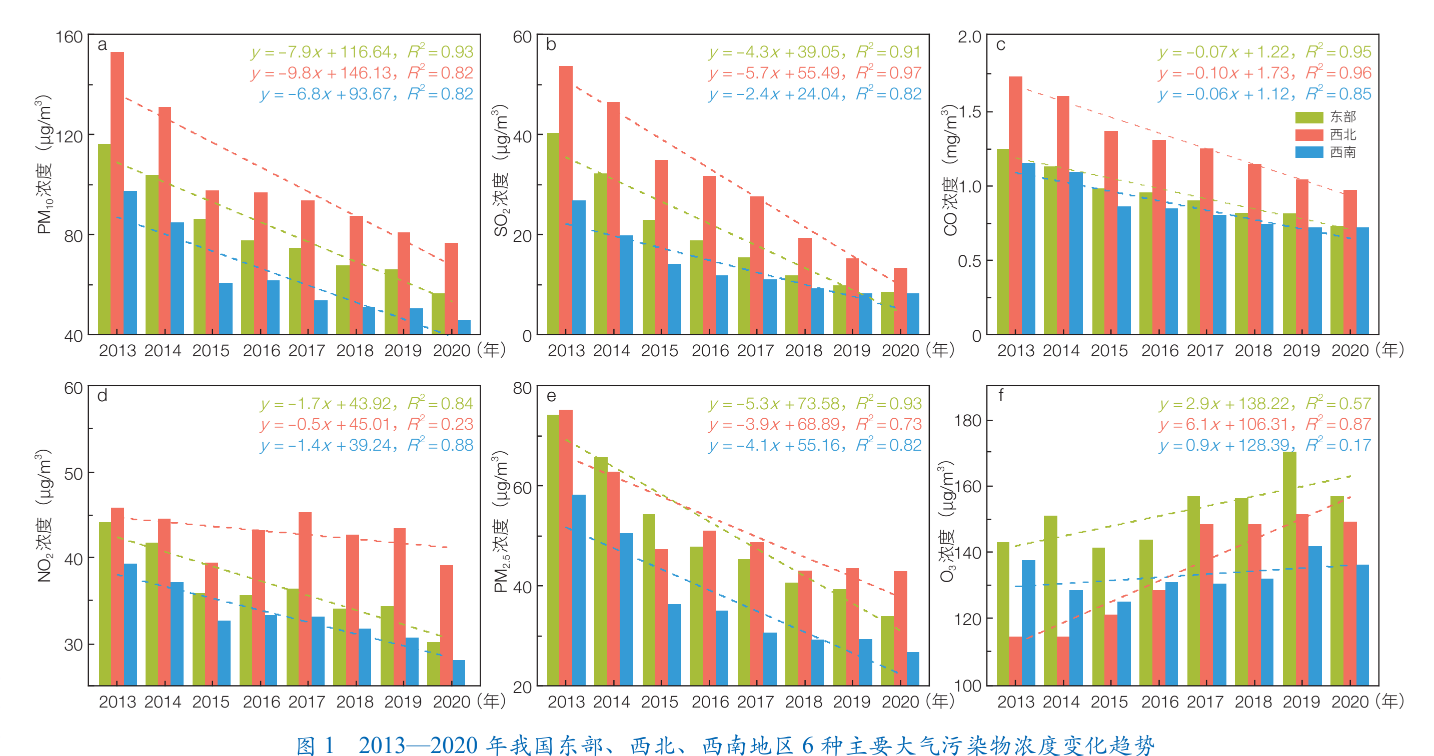


图 1　2013—2020 年我国东部、西北、西南地区 6 种主要大气污染物浓度变化趋势

Figure 1　Annual trends of six major air pollutants in eastern, northwest, and southwest China from 2013 to 2020

域（河北兴隆、吉林长白山、新疆阜康、四川贡嘎山和广东鼎湖山）背景站的苏码罐采样（每周 1次）分析结果，分析了 2013—2020 年 CO_2 体积分数的变化趋势。结果表明，我国东部地区的兴隆、长白山和鼎湖山 CO_2 体积分数平均年际增长值为 2.5×10^{-6}；西南地区的贡嘎山 CO_2 体积分数年际变化值稍高于东部地区，为 3.6×10^{-6}；特别值得注意的是，西北地区的阜康 CO_2 体积分数年际变化值高达 5.4×10^{-6}（图 2），显著高于我国其他地区。这一结果表明，西北地区已经成为全国 CO_2 排放的重要源区。

2 成因分析

CO_2 和 NO_2 主要来自化石燃料燃烧。西北地区 CO_2 浓度大幅升高表明化石燃料在该区域使用量增加，而 NO_2 浓度下降幅度较低表明该区域可能存在末端治理设施投入和运行不足的情况。以下将结合统计数据，从产业结构调整、末端处理设施运行和投入情况两个方面讨论我国不同地区大气污染物和温室气体浓度变化的成因。

2.1 产业结构调整

我国东部地区人口集中，用电负荷大，但能源资源较为匮乏。与之对应，西北地区人口稀少，用电负荷小，能源资源丰富。我国目前重要的能源分配方式之一是将西北地区的能源输送到东部地区，用于电力生产或其他行业。然而，能源若在西北当地使用则具

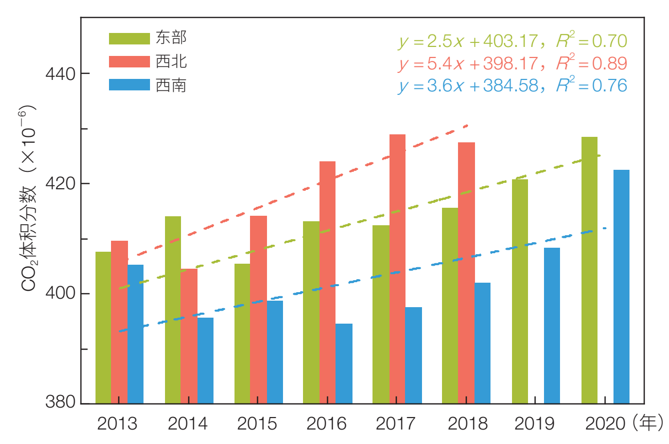


图 2　2013—2020 年我国东部、西北和西南地区 CO_2 体积分数变化趋势

Figure 2　Annual trends of CO_2 in eastern, northwest, and southwest China from 2013 to 2020

chinaXiv:202303.10092v1

chinaXiv:202303.10092v1

有降低运输成本和改善产业和能源结构两大优势。因此，立足优势资源，因地制宜能源高效利用，成为我国产业结构调整的重要手段。

近年来，产业结构调整对能源结构改变的作用体现得淋漓尽致。对比2013年，2019年东部和西南地区能源使用量分别增加11.7%和12.8%。与此同时，西北地区能源使用量增长达27.0%。详细分析能源消费结构可以发现，西南地区油品和燃气消耗大幅增加，增加幅度分别达到31.7%和70.2%；西北地区燃气消耗增加较多，达60.6%。尽管如此，西北和西南地区的油品和燃气用量合计占当地能源消费的比例不超过5%，所以并不是这2个区域能源消耗增加的主要方面。因此，煤炭使用成为西北地区能源消耗增加的关键因子。与2013年相比，2019年我国东部和西南地区煤炭使用量分别从27.1亿吨和4.3亿吨降低到26.1亿吨和3.4亿吨。但同时，西北地区煤炭使用量却从11.8亿吨增加到16.6亿吨，增幅高达40.7%（图3）。其中，新疆、宁夏、内蒙古、山西和陕西煤炭使用量增加最为显著，分别增加66.9%、60.8%、40.4%、40.1%和24.9%。西北地区煤炭使用量的增加决定了该区域温室气体的增长趋势。

详细分析我国工业产品产量发现，煤炭消费主要集中在电力供应、黑色金属冶炼及其他无机工业（如炼焦、硫酸、烧碱、纯碱、化肥）产业上（图4）。这些产业在西北地区的增量直接导致西北地区煤炭使用量的增加。与2013年相比，2019年我国东部和西南地区火力发电增加22.9%和−0.9%，西北地区增幅却高达41.2%。西北地区向外输出电量由2013年的2 957.8亿千瓦时增加到2019年的4 927.6亿千瓦时，增幅高达66.6%。除此之外，西北地区生铁、粗钢、钢材、焦炭、硫酸、烧碱、纯碱和化肥产量亦大幅增加，增幅分别为22.4%、31.7%、23.1%、12.5%、24.2%、42.3%、43.4%和25.2%。

综上，产业结构的调整，特别是电力、黑色金属冶炼及其他无机化学工业的发展，带动了煤炭使用的大幅增加，成为西北地区大气污染趋于严重和温室气体持续升高的主要原因。

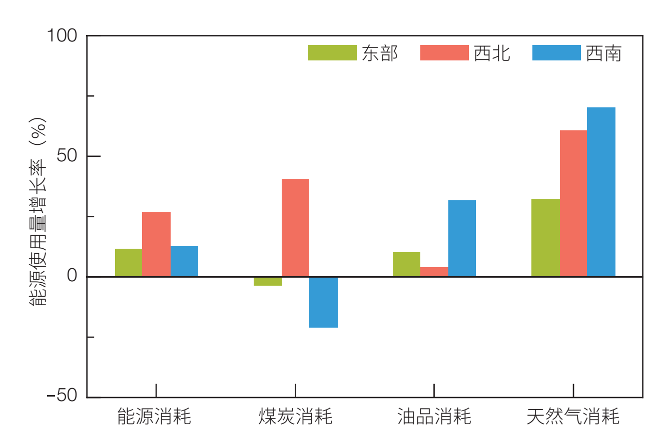


图3　我国东部、西北和西南地区2019年相比2013年能源使用增长情况

Figure 3　Growth rate of energy usage in eastern, northwest, and southwest China in 2019 compared with 2013

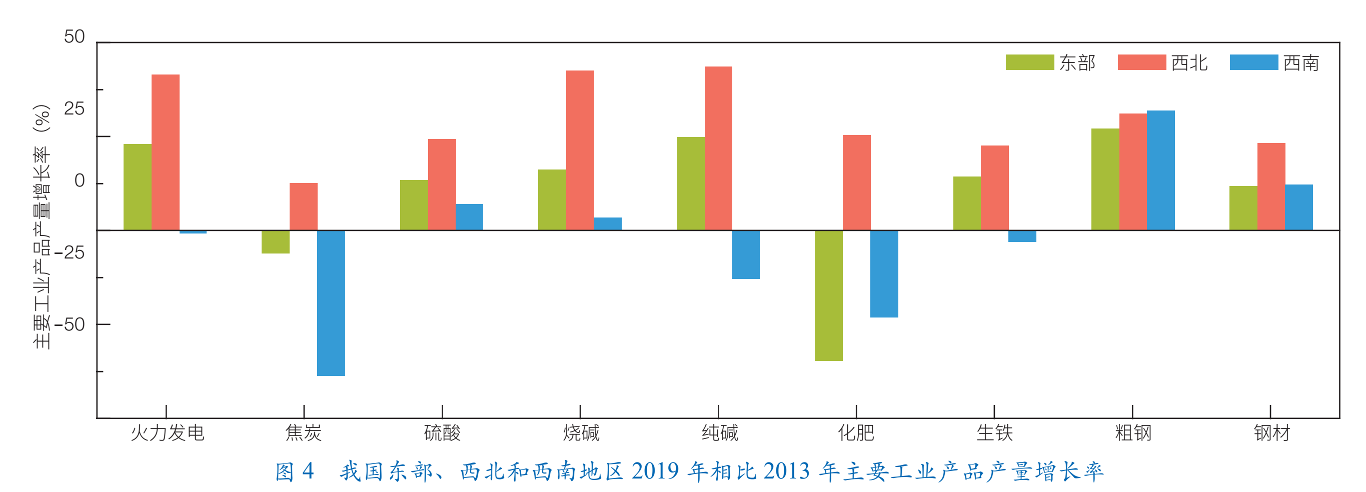


图4　我国东部、西北和西南地区2019年相比2013年主要工业产品产量增长率

Figure 4　Growth rate of output of industrial products in eastern, northwest, and southwest China in 2019 compared with 2013

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202303.10092v1

2.2 末端治理不完善

虽然西北地区煤炭的大量使用是大气污染恶化的主要原因，但如果末端治理设施能同步跟上并严格管理，西北地区大气污染应能得到有效缓解。事实上，统计 2013 年和 2019 年工业废气处理设施装机情况可以发现，与 2013 年相比，2019 年我国东部地区废气末端处理设施套数增加 109.5%，西南和西北地区仅增加 75.0% 和 64.3%。更糟糕的是，东部地区工业废气治理运行费用增加 66.1%，而西北和西南地区仅增加 48.7 和 24.9%（图 5）。这说明我国中西部地区不仅工业废气治理设备装机量严重滞后，工业废气治理运行过程中的后续投入也明显不足。

由于不同区域燃煤量有较大差异，为了区分单位煤炭工业废气处理能力，本研究分别计算燃煤量和工业废气治理设施数的比值，以及工业废气治理运行费用和燃煤量的比值，以获得废气治理设施负荷和单位煤炭治理投入（图 5）。相比于 2013 年，2019 年东部和西南地区废气治理设施负荷分别从 16 000 吨/套和 17 000 吨/套下降到 7 000 吨/套和 7 000 吨/套，废气治理设施负荷分别下降 54.0% 和 54.8%，大气污染物治理效率大幅提升。西北地区废气治理设施负荷从 31 000 吨/套下降到 27 000 吨/套，降幅仅为 14.4%。较高的废气治理设施负荷表明西北地区工业废气治理设施装机量严重滞后。除此之外，东部和西南地区单位煤炭治理投入分别从 2013 年的 39.7 元/吨和 35.4 元/吨增加到 2019 年的 68.3 元/吨和 55.9 元/吨，废气治理投入分别增加 72.2% 和 57.8%。西北地区单位煤炭治理投入却变化较小，仅从 22.8 元/吨增加到 24.1 元/吨，增加幅度（5.7%）显著低于东部和西南地区。这一结果也被《2020 年度钢铁行业环境评估报告》④所证实。

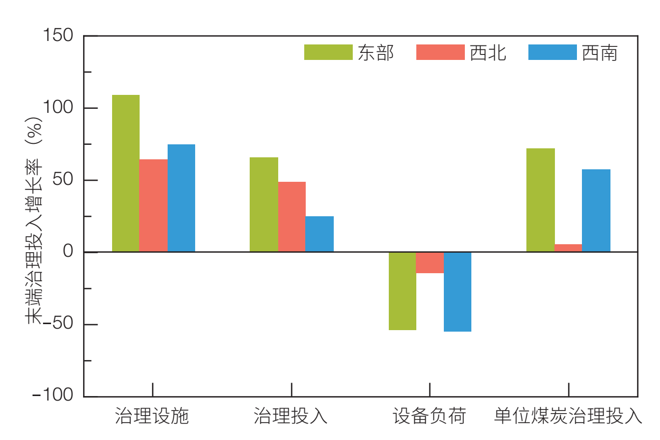


图 5　我国东部、西北和西南地区 2019 年相比 2013 年工业废气治理设施变化率

Figure 5　Growth rate of industrial waste gas treatment facilities in eastern, northwest, and southwest China in 2019 compared with 2013

综上，西北地区工业废气治理设施装机量严重滞后及后续投入的治理费用不足是导致大气污染现象向西北迁移的另一重要原因。

3 对策建议

我国西北地区干旱少雨，生态环境脆弱，空气质量恶化和气候变化会让当地的生态环境雪上加霜。同时，受西风带影响，西北地区大气污染物和温室气体会向东部地区输送，从而影响东部地区大气环境[13]。在电力供应和重工业向西北迁移的同时，末端治理设施处理能力未能及时跟上，两类因素共同诱发我国大气污染和碳排放高值区从东部向西北地区迁移的趋势。防控大气污染和碳排放向西北迁移：政策是导向，技术是核心，管理是关键。为避免西北地区重蹈“先污染后治理”的覆辙，提出 2 点对策建议。

3.1 因地制宜，深化产业结构改革

我国西北地区在清洁能源储量上拥有 2 个得天独厚的优势：① 干旱少云，日照时间长，太阳能储量丰富，可开发储量占全国的 82.6%。② 温差大，植被覆

④ 2020 年度钢铁行业环境评估报告 . (2021-10-15)[2021-12-24]. http://www.chinaisa.org.cn/gxportal/xfgl/portal/content.html?articleId=9e6e6f12a7e94bb3dd753d290957424da5e31b8e1850db8b4dfe17db7defd6ba&columnId=3683d857cc4577e4cb75f76522b7b82cda039ef70be46ee37f9385ed3198f68a.

chinaXiv:202303.10092v1

盖少，风能储量丰富，可开发储量占全国53.5%[14]。虽然西北地区清洁能源储量丰富，但由于风能和太阳能存在天然的供能稳定性不足，以及电力输送和存储技术滞后等问题，“弃风弃电”现象在该区域普遍存在[15]。因此，大气污染和碳排放高值区向西北迁移并不是因为进行产业结构改革，恰恰是因为产业结构改革不到位、不智能、不彻底。

为了改善这种状况，应以《中共中央 国务院关于新时代推进西部大开发形成新格局的指导意见》为准绳，改变“西电东送”的格局，推进高耗能产业向西部迁移，让“西电”就地消纳。具体可通过降低东部地区能耗指标，增加西北地区能耗指标，倒逼高耗能产业从东部向西北地区迁移，这将从根本上破解电力远距离运输和本地消纳的难题，提高清洁能源利用率。这一策略不仅能推进东部地区产业升级、促进西北地区的经济发展，还能引导重污染企业从“高耗能、高排碳”向“高耗能、低排碳”模式转变，从而实现在不牺牲经济发展的前提下达成“双碳”目标。

3.2 秉要执本，推进氮氧化物和挥发性有机物减排

清洁能源的开发和使用不是一蹴而就的。在清洁能源开发的增长期，强化大气污染物排放的末端处理能力是改善空气质量的唯一途径。西北地区应充分吸取东部地区的经验教训，提高规模以上行业（尤其是电力和非电工业）大气污染物末端处理设施的装机量，增加治理设施运行过程中的资金投入，加强末端治理设施的监管。

大气污染防治策略执行多年以来，SO_2 和 $PM_{2.5}$ 减排潜力逐渐被压缩，氮氧化物和挥发性有机物是目前我国大气污染物减排的核心物种。依据《十四五规划》中“氮氧化物和挥发性有机物排放总量下降10%以上”的新要求，建议以黑色和有色金属冶炼等无机工业为重点推进氮氧化物减排，以黑色和有色金属冶炼、石油化工、油品储运等行业为重点推进挥发性有机物减排，最终实现高耗能产业的大气污染深度治理，促进生态环境治理的协同增效。

参考文献

1 United States Environmental Protection Agency. EPA/600/P-99/002aF Air Quality Criteria for Particulate Matter. North Carolina: Office of Research and Development, 2004.

2 Tang G Q, Zhao P S, Wang Y H, et al. Mortality and air pollution in Beijing: The long-term relationship. Atmospheric Environment, 2017, 150: 238-243.

3 Seinfeld J, Pandis S. Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate (3rd edition). Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2016.

4 Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2021: The Physical Science Basis, AR6. Geneva: IPCC, 2021.

5 Wang Y S, Yao L, Wang L L, et al. Mechanism for the formation of the January 2013 heavy haze pollution episode over central and eastern China. Science China Earth Sciences, 2014, 57(1): 14-25.

6 Wang Y S, Li W J, Gao W K, et al. Trends in particulate matter and its chemical compositions in China from 2013-2017. Science China Earth Sciences, 2019, 62(12): 1857-1871.

7 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴2014. 北京: 中国统计出版社, 2015.
NationalBureauof Statisticsof China. China Statistical Yearbook 2014. Beijing: China Statistics Press, 2015. (in Chinese)

8 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴2020. 北京: 中国统计出版社, 2021.
National Bureauof Statisticsof China. China Statistical Yearbook 2020. Beijing: China Statistics Press, 2021. (in Chinese)

9 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴2014, 北京: 中国统计出版社, 2015.
Department of Energy Statistics, National Bureau of Statistics. China Energy Statistical Yearbook 2014. Beijing: China Statistics Press, 2015. (in Chinese)

10 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴2020. 北京: 中

ChinaXiv合作期刊

国统计出版社, 2020.
Department of Energy Statistics, National Bureau of Statistics. China Energy Statistical Yearbook 2020. Beijing: China Statistics Press, 2020. (in Chinese)

11 国家统计局, 环境保护部. 中国环境统计年鉴2014. 北京: 中国统计出版社, 2014.
Ministry of Environmental Protection, National Bureau of Statistics. China Environment Statistical Yearbook 2014. Beijing: China Statistics Press, 2014. (in Chinese)

12 国家统计局, 生态环境部. 中国环境统计年鉴2020. 北京: 中国统计出版社, 2020.
Ministry of Ecological Environment, NationalBureauof Statistics. China Environment Statistical Yearbook 2020. Beijing: China Statistics Press, 2020. (in Chinese)

13 周淑贞, 张如一, 张超. 气象学与气候学（第三版）. 北京: 高等教育出版社, 1997.
Zhou S Z, Zhang R Y, Zhang C. Meteorology and Climatology (3rd Ed.). Beijing: Higher Education Press, 1997. (in Chinese)

14 黄其励, 倪维斗, 王伟胜, 等. 西部清洁能源发展战略研究. 北京: 科学出版社, 2019.
Huang Q L, Ni X D, Wang W S, et al. Research on Clean Energy Development Strategy in Western China. Beijing: Science Press, 2019. (in Chinese)

15 韦福雷. 论“双碳”下高耗能产业向西部地区的转移. 开放导报, 2021, (5): 21-27.
Wei F L. On the transfer of high energy consuming industries to the west region “dual carbon”. China Opening Journal, 2021, (5): 21-27. (in Chinese)

Alert to the Migration of Air Pollution and Carbon Emission to Northwest China

TANG Guiqian[1,2,4] LIU Yuting[1,4] GAO Wenkang[1] WANG Yinghong[1] SONG Tao[1,3] CHENG Mengtian[1] WANG Yuesi[1,2,4*]

（1 State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;
2 Center for Excellence in Regional Atmospheric Environment, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China;
3 National Earth System Science Data Center, Beijing 100101, China;
4 College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China）

Abstract Air pollutants have strong homology with greenhouse gases and are closely related to fossil fuel combustion. The high-intensity energy use in the eastern region of China has turned this region into a hot area of carbon dioxide emission and heavy air pollution in the past. Since the implementation of the Action Plan for the Prevention and Control of Air Pollution, the adjustment of industrial structure and the improvement of terminal treatment technology have been driving the succession of key species of air pollution and the spatio-temporal distribution of greenhouse gases in China. This paper analyzes the trend in major air pollutants and greenhouse gas concentration in different regions of China from 2013 to 2020, and reveals the migration of air pollution and carbon emissions from the east to the northwest China. Based on statistical data, the causes of the changes in the spatio-temporal distribution of air pollutants and greenhouse gases in China are clarified, and corresponding solutions are proposed. The results can provide scientific and technological support for realizing the goal of pollution and carbon reduction synergy.

Keywords air pollution, greenhouse gases, spatio-temporal distribution, West-East Electricity Transmission, pollution and carbon reduction

*Corresponding author

chinaXiv:202303.10092v1

ChinaXiv合作期刊



唐贵谦　中国科学院大气物理研究所研究员。主要研究领域：大气污染、大气环境、大气边界层物理等。主持国家自然科学基金委员会、中国科学院、科学技术部等单位的10多项重大课题，参与多项国家重大活动的空气质量保障工作。E-mail: tgq@dq.cern.ac.cn

TANG Guiqian　Ph.D., Professor of Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences (CAS). Dr. Tang mainly engages in the research on air pollution, atmospheric environment and atmospheric physics in the boundary layer, etc. In recent years, he has undertaken more than 10 important projects of National Natural Science Foundation of China, CAS, Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China, and so on. He participates in air quality assurance in a number of major national-level activities, such as Olympics and APEC. E-mail: tgq@dq.cern.ac.cn



王跃思　中国科学院大气物理研究所研究员。主要研究领域：大气污染、大气环境、大气化学等。主持国家自然科学基金委员会、中国科学院、科学技术部等单位的20多项重大课题，参与多项国家重大活动的空气质量保障工作。E-mail: wys@mail.iap.ac.cn

WANG Yuesi　Ph.D., Professor of Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences (CAS). Dr. Wang's research focuses on air pollution, atmospheric environment, atmospheric chemistry, etc. In recent years, he has mainly undertaken more than 20 major projects of National Natural Science Foundation of China, CAS, Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China, and so on. He participates in air quality assurance in a number of major national-level activities, such as Olympics and APEC.
E-mail: wys@mail.iap.ac.cn

chinaXiv:202303.10092v1

■责任编辑：岳凌生